ارزیابی اثرات توپوگرافی بر تفرق امواج لرزه‌ای بااستفاده از روش المان مرزی★

(یادداشت پژوهشی)

محسن ایثاری[۱]		رضا تاری‌نژاد[۲]

چکیده *در این تحقیق برای ارزیابی اثرات توپوگرافی از روش المان مرزی سه‌بعدی که یکی از فنون عددی بسیار قدرتمند برای تحلیل مسائل به‌ویژه موضوعات مربوط به انتشار امواج است، استفاده می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل توپوگرافی‌های مختلف به شکل‌های مثلثی، ذوزنقه‌ای، نیم‌دایره‌ای و نیم‌بیضوی تحت اثر امواج لرزه‌ای SH نشان می‌دهد که یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر الگوی رفتار دینامیکی دره، پارامتر هندسی (شکل و عمق) می‌باشد، که این عوامل در فرکانس‌های مختلف اثرات متفاوتی از خود نشان می‌دهند. علاوه‌براین، اثر پارامترهای دیگر مانند زاویهٔ برخورد و همچنین خواص مصالح دره (مدول الاستیسیته، میرایی و ضریب پواسون) نیز مورد ارزیابی قرار گرفتند.*

واژه‌های کلیدی توپوگرافی، المان مرزی، تفرق امواج، اثرات ساختگاه، هندسهٔ دره.

Investigation Effects of Canyon Topography on the Seismic Wave Scattering by 3D-BEM

M. Isari		R. Tarinejad

Abstract *A Boundary Element Code has been developed and verified by numerous study .The results of the analysis of topographic forms triangular, trapezoidal, semi-circular and semi-elliptical under seismic SH waves show that one of the important factors that influence on the dynamic behavior canyons are geometric parameters (shape and depth). These factors with different frequency have various effect. The results indicated that several parameters such as wave parameters (frequency and direction) are factors that affecting the pattern of displacement on the canyon. It was demonstrated that the effects of this parameters are highly dependent with incoming frequency. That is demonstrated with increasing frequency, Effects of depth is increases. It is clear that, the graph of materials effects (damping and Poisson) on the dynamic behavior and displacement pattern are undeniable and increase the accuracy of result that need to be considered.*

Key Words Topography, Three-Dimensional Boundary Element method, Wave Scattering, Site Effect, Canyon Geometry.

★تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۱۲/۲۹ تاریخ پذیرش آن ۹۵/۲/۱۵ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه تبریز.

(۲) نویسنده مسئول: استادیار، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه تبریز.

Email : r_tarinejad@tabrizu.ac.ir

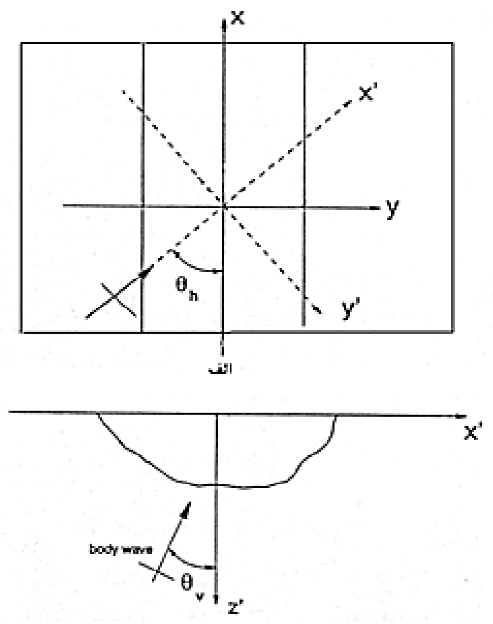
مقدمه

مطالعات زیادی درخصوص پدیدهٔ تشدید توپوگرافی روی امواج لرزه‌ای توسط محققان مختلف انجام گرفته است. یکی از نمونه‌های بسیار واضح درخصوص این پدیده، گسیختگی‌های سنگی به‌وجودآمده در تکیه‌گاه سد پاکویما واقع در کالیفرنیا در طول زمین‌لرزه‌های بزرگ می‌باشد. بررسی‌های صورت‌گرفته نشان می‌دهند این گسیختگی‌های سنگی مربوط به پدیدهٔ اثر توپوگرافی می‌باشد. رکوردهای زمین‌لرزهٔ ثبت‌شده در زلزلهٔ ۱۹۹٤ نورتریج و ۱۹۷۱ سن‌فرناندو و بالای کوه و قعر درهٔ نزدیک مخزن و سد پاکویما نشان می‌دهند که ماکزیمم شتاب زمین در بالای کوهی که جناح چپ سد را تشکیل می‌دهد در دو زلزلهٔ مذکور به‌ترتیب برابر g ۱/۵۸ و g ۱/۰۵ بوده است، در حالی که در قعر دره ۰/٤۳g و g ۰/٤۹ اندازه‌گیری شده است. بدین ترتیب بزرگ‌نمایی توپوگرافی برای زمین‌لرزهٔ سال ۱۹۷۱ زلزلهٔ سن‌فرناندو و زمین‌لرزهٔ سال ۱۹۹٤ زلزلهٔ نورتریج مشخص شدند [1, 2]. موسسیان و دراوینسکی در سال ۱۹۹۰ به بررسی مسئلهٔ بزرگ‌نمایی امواج الاستیک در یک درهٔ سه‌بعدی به‌شکل دل‌خواه پرداختند و پاسخ‌های حالت دائم و گذرا را به‌دست آوردند [3, 4]. یوان و جیانگ به‌کمک گسسته‌سازی به‌شکل نوار محدود، فرمولاسیون روش المان مرزی در حل مسائل تفرق از یک درهٔ سه‌بعدی به‌شکل دل‌خواه را استخراج کردند. با این روش حجم محاسبات کاهش می‌یابد و دقت محاسبات درمقایسه با روش‌های مرسوم المان محدود و المان مرزی بالا می‌رود [5]. اشراقی و دراوینسکی توانستند بااستفاده از بسط توابع موج در مختصات کروی، مسئلهٔ تفرق امواج هارمونیک در برخورد با درهٔ سه‌بعدی را مورد تحلیل و ارزیابی قرار دهند [6]. از موارد دیگر تحقیقات صورت‌گرفته در این زمینه می‌توان به تحقیق تاری‌نژاد و همکاران اشاره کرد که به بررسی و آنالیز تأثیرات بزرگ‌نمایی توپوگرافی بر ساختگاه دره‌ای بااستفاده از روش المان مرزی سه‌بعدی پرداخته‌اند. آنها با درنظر گرفتن بعضی از پارامترهای تأثیرگذار بر بزرگ‌نمایی جابه‌جایی حاصل از زلزله مانند زاویه و فرکانس امواج، به بررسی جداگانهٔ این عوامل پرداخته‌اند [۷]. کمالیان و همکاران مطالعات پارامتریکی را به‌منظور بررسی رفتار لرزه‌ای تپه‌های نیم‌سینوسی، نیم‌بیضی و ذوزنقه‌ای‌شکل دربرابر امواج قائم SV و P انجام دادند. در این مطالعات که بااستفاده از روش المان مرزی انجام گردید تأثیرات نسبت شکل، نسبت طول موج برخوردی به ابعاد عارضه و ضریب پواسون به‌طور جداگانه در پاسخ لرزه‌ای تپه‌های یادشده مورد بررسی قرار گرفتند [8]. کمالیان و همکاران در مقاله‌ای تحت عنوان آنالیز رفتار دوبعدی ساختگاه در حوزهٔ زمان برروی توپوگرافی سطوح بااستفاده از روش المان مرزی، به بیان فرمول‌بندی پیشرفته در حوزهٔ زمان، توسط روش المان مرزی دوبعدی برای حالت الاستودینامیک خطی پرداخته‌اند [9]. یکی دیگر از تحقیقات انجام‌شده توسط کمالیان و همکاران تحلیل‌های پارامتری متعددی است که روی دره‌ای به‌شکل نیم‌سینوسی تحت اثر امواج فشاری و برشی منتشرشده در راستای قائم در حالت دوبعدی بااستفاده از روش المان مرزی مستقیم در حوزهٔ زمان انجام دادند. طول موج و هندسهٔ ساختگاه و در درجه‌ای پایین‌تر مشخصات مصالح و نوع موج مشخصه‌های حاکم بر الگوی بزرگ‌نمایی این دره‌ها شناسایی شدند [10]. امیدوار و رحیمیان در مقالات به بررسی تفرق سه‌بعدی امواج هارمونیک مسطح برروی سطوح با توپوگرافی خاص بااستفاده از روش المان مرزی سه‌بعدی پرداختند. نشان داده می‌شود که برای بررسی هرچه دقیق‌تر حرکات سطحی زمین در توپوگرافی‌های مختلف باید تمام پارامترهای مؤثر مانند هندسهٔ محل، خصوصیات مکانیکی مصالح زمین‌شناسی موجود (دانسیته، نسبت پواسون، مدول برشی) نوع امواج، آزیموت و زاویهٔ برخورد و همچنین فرکانس موج درنظر گرفته شود [11,12]. از دیگر مطالعات صورت‌گرفته در این زمینه می‌توان به پژوهش‌های گتمیری و همکاران اشاره کرد که بااستفاده از روش المان مرزی بهبودیافته، به بررسی

رفتار الاستودینامیک دوبعدی سطوح شیبدار در حوزهٔ زمان پرداخته‌اند. این روش براساس کوتاه شدن انتگرال‌های زمانی است که منجر به کاهش سریع جواب‌های اساسی با گذشت زمان می‌شود [13, 14]. سهرابی بیدار و همکاران به بیان فرمول‌بندی روش المان مرزی سه‌بعدی در حوزهٔ زمان برای تحلیل رفتار ساختگاه پرداختند. برای ارزیابی دقت فرمول‌بندی ارائه‌شده، رفتار لرزه‌ای توپوگرافی‌های مختلف به‌شکل دره و تپه که دربرابر برخورد امواج P,S قرار گرفت ارزیابی شد. نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل سه‌بعدی رفتار لرزه‌ای نشان داد که تپهٔ سه‌بعدی متقارن دارای پتانسیل بزرگ‌نمایی بیشتری درمقایسه با تپه‌های نا متقارن سه‌بعدی و دوبعدی می‌باشد [15]. سهرابی بیدار و همکاران بااستفاده از روش المان مرزی سه‌بعدی مستقیم در حوزهٔ زمان پاسخ درهٔ سه‌بعدی گوسی‌شکل را به‌صورت پارامتریک مورد مطالعه قرار دادند. طول موج و هندسهٔ ساختگاه و تا حدودی نوع موج مهاجم پارامترهای مؤثر بر بزرگ‌نمایی این نوع تپه‌ها شناسایی شدند. دره‌های دوبعدی بزرگ‌نمایی و کوچک‌نمایی کوچک‌تری را نسبت به دره‌های سه‌بعدی با هندسه و ابعاد مشابه نشان می‌دهند [16]. در تحقیق حاضر که براساس روش المان مرزی سه‌بعدی در حوزهٔ فرکانس می‌باشد مطالعات پارامتری متنوعی روی دره با هندسه‌های مختلف انجام می‌گیرد و اثرات پارامترهای مختلف در پدیدهٔ تفرق امواج لرزه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرند.

حرکات سطح آزاد زمین و دره

گام نخست در بررسی رفتار دینامیکی سازه‌های واقع در ساختگاه‌های دره‌ای در اثر زلزله، شناسایی امواج ایجادشده و محاسبهٔ جابه‌جایی‌های به‌وجودآمده در محیط نیم‌بی‌نهایت زمین مسطح (بدون وجود دره) در محل تکیه‌گاه‌ها می‌باشد. در حالت سه‌بعدی فرض می‌شود که بردار عمود بر جبههٔ امواج لرزه‌ای حجمی با بردار انتشار موج، زاویه‌های θ_v با محور قائم (z) و θ_h با محور طولی دره (x) می‌سازد. در شکل (۱) مشخصات سیستم و یک مقطع عرضی دل‌خواه از ساختگاه به‌همراه زوایای برخورد افقی و قائم امواج نشان داده شده است.



شکل ۱ مشخصات سیستم و یک مقطع عرضی دل‌خواه از دره [۷]

در دستگاه مختصات $x'-y'-z'$ جابه‌جایی‌های امواج برخوردی هارمونیک در هر نقطهٔ دل‌خواه از ناحیهٔ نیم‌بی‌نهایت زمین را می‌توان توسط سه مؤلفهٔ جابه‌جایی زیر معرفی کرد.

$$\{u'(x')\}_{inc} = A\{u'\}e^{-ik'x'+iv'z'+i\omega t} \quad (۱)$$

که درآن A دامنهٔ جابه‌جایی، ω فرکانس موج، $v'=(\omega/c_p)\cos\theta_v$ و $k'=(\omega/c_p)\sin\theta_v$ برای امواج فشاری و $v'=(\omega/c_s)\cos\theta_v$ و $k'=(\omega/c_s)\sin\theta_v$ برای امواج برشی می‌باشند. c_p و c_s به‌ترتیب سرعت امواج P و S هستند و بردار $\{u'\}$ عبارت است از:

$$\{u'\}=\begin{cases}(\sin\theta_v, o, -\cos\theta_v)^T & \text{for} \quad p-wave\\ (\cos\theta_v, o, \sin\theta_v)^T & \text{for} \quad SV-wave\\ (o,1,o)^T & \text{for} \quad SH-wave\end{cases} \quad (۲)$$

جابه‌جایی‌های میدان آزاد زمین با مجموع جابه‌جایی‌های برخوردی و جابه‌جایی‌های ناشی از

امواج منعکس‌شده برابر می‌باشد. در دستگاه مختصات $x'-y'-z'$ که امواج در صفحهٔ $x'-z'$ منتقل می‌شوند جابه‌جایی‌های حالت آزاد را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود. به‌منظور اختصار در رابطه‌های ارائه‌شده درادامه، ضریب $e^{i\omega t}$ حذف شده است.

$$\{u'_{ff}(x')\} = \begin{Bmatrix} o \\ 1 \\ o \end{Bmatrix} e^{k_s(-\sin\theta_v x' + \cos\theta_v z')t} + \begin{Bmatrix} o \\ 1 \\ o \end{Bmatrix} e^{k_s(-\sin\theta_v x' - \cos\theta_v z')t} \quad (۳)$$

معادلهٔ حاکم بر حل مسئله

معادلات حاکم بر مسائل الاستودینامیک از روابط ناویر تبعیت می‌کند که به‌صورت برداری و براساس مؤلفه‌های سرعت امواج به‌شکل زیر قابل ارائه است.

$$c_1^2\nabla(\nabla.u) - c_2^2\nabla\times\nabla\times u - \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -b \quad (٤)$$

در این رابطه $c_1 = (\lambda + 2\mu/\rho)^{0.5}$ و $c_2 = (\mu/\rho)^{0.5}$ به‌ترتیب سرعت امواج فشاری و برشی در محیط، b نیروهای حجمی در جرم واحد و u بردار جابه‌جایی‌ها می‌باشند. ضمن این‌که λ و μ ثابت‌های لامه و ρ جرم حجمی جسم موردنظر می‌باشند. درصورت استفاده از روش تحلیل در حوزهٔ فرکانس، بردار جابه‌جایی‌ها برای تحریک هارمونیک با فرکانس ω به فرم زیر درمی‌آید.

$$u(t) = \bar{u}(\omega)e^{i\omega t} \quad (٥)$$

در رابطهٔ فوق، $\bar{u}$ دامنهٔ بردار جابه‌جایی‌ها در حوزهٔ فرکانس می‌باشد. بااستفاده از رابطهٔ (٥) معادلهٔ برداری (٤) به‌شکل مستقل از زمان به‌صورت رابطهٔ (٦) قابل بازنویسی است.

$$c_1^2\nabla(\nabla.\bar{u}) - c_2^2\nabla\times\nabla\times\bar{u} + \omega^2\bar{u} = -b \quad (٦)$$

معادلهٔ انتگرال مرزی حاکم بر مسئله می‌تواند از تئوری تقابل دینامیکی به فرم زیر به‌دست آید.

$$c^i u^i + \int_\Gamma p^* u d\Gamma = \int_\Gamma u^* p d\Gamma \quad (٧)$$

در این رابطه u^i، مؤلفه‌های تغییرمکان در نقطه مرزی i، u و P مؤلفه‌های تغییرمکان و ترکشن روی تمام مرز، u^* و p^* جواب‌های اساسی تغییرمکان و ترکشن روی مرز در اثر بار واحد متمرکز در نقطهٔ i می‌باشند.

ضریب مستقل c^i معروف به ترم پرش وابسته به هندسهٔ خاص مرز در نقطهٔ i می‌باشد و می‌تواند از ترکشن صفر جسم صلب محاسبه گردد [17, 18].

زمانی که مرز به تعداد ne المان گسسته‌سازی شد با جای‌گذاری معادلات پارامترهای گسسته‌سازی‌شده در معادلهٔ (٧) معادله زیر به‌دست خواهد آمد:

$$c^i u^i + \sum_{j=1}^{ne}\left\{\int_{\Gamma_j} p^*\Phi d\Gamma\right\}u^j = \sum_{j=1}^{ne}\left\{\int_{\Gamma_j} u^*\Phi d\Gamma\right\}p^j \quad (٨)$$

که Γ_j نشان‌دهندهٔ سطح المان j می‌باشد. معادلهٔ فوق را می‌توان به فرم زیر بازنویسی کرد.

$$c^i u^i + \sum_{m=1}^{n}\hat{H}^{im}u^m = \sum_{j=1}^{ne}G^{ij}p^j \quad (٩)$$

بنابراین برای تمام گره‌های i می‌توان سیستم معادلات را به فرم کلی زیر بیان کرد.

$$HU=GP \quad (١٠)$$

جواب‌های اساسی

جواب‌های معادلهٔ (٦) به‌ازای بار نقطه‌ای هارمونیک با دامنهٔ واحد که درجهت اختیاری (بردار واحد) اعمال گردد، جواب‌های اساسی یا توابع گرین نامیده می‌شوند. این توابع بااستفاده از تجزیهٔ هلمهولتز معادلات حاکم به‌دست می‌آیند. درادامه جواب‌های اساسی مربوط به تغییرمکان و ترکشن ارائه می‌شوند. این جواب‌ها در منابع موجود همواره با غلط‌های تایپی همراه بوده است که در اینجا فرمول‌های دقیق آنها بااستفاده از محاسباتی که نگارنده انجام داده است ارائه می‌گردند.

$$u_{lk}^* = \frac{1}{\alpha\pi\rho c_2^2}\left[\psi\delta_{lk} - \chi r_{,l}r_{,k}\right] \quad (١١)$$

که در آن ψ و χ برابر مقادیر زیر می باشند.

$$\psi = \frac{\exp(-k_2 r)}{r} + (\frac{1}{k_2^2 r^2} + \frac{1}{k_2 r})\frac{\exp(-k_2 r)}{r} - \frac{c_2^2}{c_1^2}(\frac{1}{k_1^2 r^2} + \frac{1}{k_1 r})\frac{\exp(-k_1 r)}{r}$$

$$\chi = (\frac{3}{k_2^2 r^2} + \frac{3}{k_2 r} + 1)\frac{\exp(-k_2 r)}{r} - \frac{c_2^2}{c_1^2}(\frac{3}{k_1^2 r^2} + \frac{3}{k_1 r} + 1)\frac{\exp(-k_1 r)}{r}$$

همچنین $\alpha = 4$ و δ_{ij} نشان‌دهندهٔ تابع دلتای کرونکر و $k_1 = \frac{i\omega}{c_1}$ و $k_2 = \frac{i\omega}{c_2}$، به‌ترتیب اعداد امواج فشاری و برشی می‌باشند. اندیس‌هایی که شامل کاما می‌باشند به‌منظور مشتق‌گیری نسبت به جهت موردنظر می‌باشد. لازم به ذکر است از روی جواب اساسی مربوط به تغییرمکان می‌توان جواب اساسی مربوط به ترکشن را محاسبه نمود. این کار بااستفاده از روابط موجود بین تنش، کرنش و تغییرمکان و نیز رابطهٔ تنش و ترکشن (قانون استوکس) صورت می‌گیرد. جواب اساسی مربوط به ترکشن محاسبه‌شده از روی جواب اساسی تغییرمکان به‌صورت زیر می‌باشد [17-18].

$$p^*_{lk} = \frac{1}{\alpha\pi}[(\frac{d\psi}{dr} - \frac{1}{r}\chi)(\delta_{lk}\frac{\partial r}{\partial n} + r_{,k}n_l) - \frac{2}{r}\chi(n_k r_{,l} - 2r_{,l}r_{,k}\frac{\partial r}{\partial n}) - 2\frac{d\chi}{dr}r_{,l}r_{,k}\frac{\partial r}{\partial n} + (\frac{c_1^2}{c_2^2} - 2)(\frac{d\psi}{dr} - \frac{d\chi}{dr} - \frac{\alpha}{2r}\chi)r_{,l}n_k] \qquad (۱۲)$$

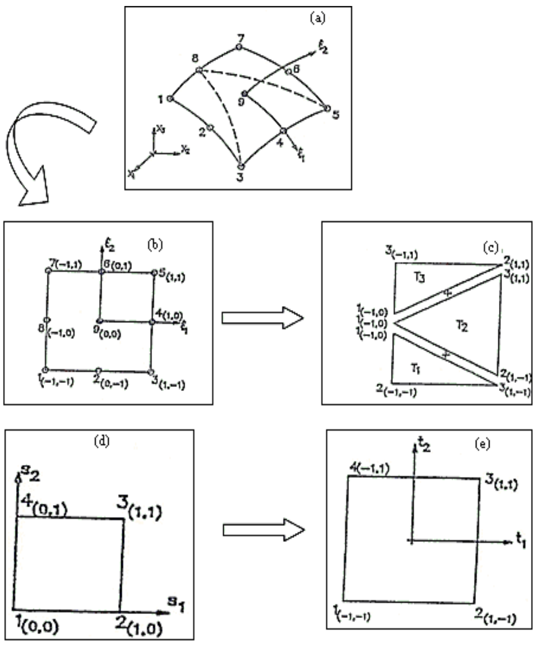
که در آن $d\psi/dr$ و $d\chi/dr$ به‌شکل زیر می‌باشند.

$$\frac{d\psi}{dr} = (-\frac{2}{r} - k_2 - \frac{3}{k_2 r^2} - \frac{3}{k_2^2 r^3})\frac{\exp(-k_2 r)}{r} + \frac{c_2^2}{c_1^2}(\frac{1}{r} + \frac{3}{k_1 r^2} + \frac{3}{k_1^2 r^3})\frac{\exp(-k_1 r)}{r}$$

$$\frac{d\chi}{dr} = (-\frac{4}{r} - k_2 - \frac{9}{k_2 r^2} - \frac{9}{k_2^2 r^3})\frac{\exp(-k_2 r)}{r} + \frac{c_2^2}{c_1^2}(\frac{4}{r} + k_1 + \frac{9}{k_1 r^2} + \frac{9}{k_1^2 r^3})\frac{\exp(-k_1 r)}{r}$$

برآورد انتگرال‌های تکین

برای انتگرال‌گیری از هسته با تکین بودن از نوع ضعیف مشابه آنچه در هسته تغییرمکان وجود دارد بااستفاده از تکنیک تبدیل انتگرال‌گیری روی المان مستطیلی به انتگرال‌گیری روی المان مثلثی می‌توان از تکین بودن رهایی یافت و از روش گوس- لژاندر انتگرال‌های اجزا مثلثی را برآورد نمود. به‌این‌منظور ابتدا المان مستطیلی برحسب این‌که نقطهٔ منبع منطبق بر کدام‌یک از نقاط المان مرزی باشد به تعداد مناسبی المان مثلثی تقسیم می‌گردد. سپس با تبدیل مختصات مناسب انتگرال‌گیری روی المان مستطیلی به انتگرال‌گیری روی المان‌های مثلثی تبدیل می‌گردند. اساس روش تعریف سیستم مختصاتی است که جاکوبین در نقطهٔ منبع صفر گردد به‌صورتی که با صفر موجود در مخرج هسته انتگرال رفع ابهام شود. برای این منظور سیستم مختصات مطابق شکل (۲) طوری تعریف می‌شود که جاکوبین در نقطهٔ منبع صفر گردد.



شکل ۲ a و b) المان مستطیلی ۹ گرهی اصلی و مادر، c) المان تقسیم‌شده به زیرالمان‌های مثلثی با تکینگی در گره شمارهٔ ۸، d و e) تبدیل‌های لازم برای انتگرال‌گیری از المان مثلثی [7]

رابطهٔ بین مختصات s_1 و s_2 و مختصات ξ_1 , ξ_2 به‌صورت زیر می‌باشند.

$$\xi_i = (1-s_1)\xi_i^1 + s_1(1-s_2)\xi_i^2 + s_1 s_2 \xi_i^3 \qquad (۱۳)$$

که در رابطهٔ فوق i=1,2 و اعداد بالای ξ

نشان‌دهندهٔ گره‌های گوشهٔ مثلث می‌باشند.

$$d\xi_1 d\xi_2 = |J_2| ds_1 ds_2 = 2A s_1 ds_1 ds_2 \qquad (14)$$

کــه در آن A مســاحت مثلــث در مختصــات بی‌بعد $\xi_1 - \xi_2$ می‌باشد.

به‌منظـور اسـتفاده از روش انتگـرال‌گیـری گـوس، حوزهٔ مربعی در سیستم $s_1 s_2$ بایستی به مربعی به طـول وجوه معادل ۲ انتقال یابد. بنـابراین بایسـتی انتقـال دوم به‌شکل زیر انجام گیرد.

$$s_i = \frac{1+t_i}{2} \qquad (15)$$

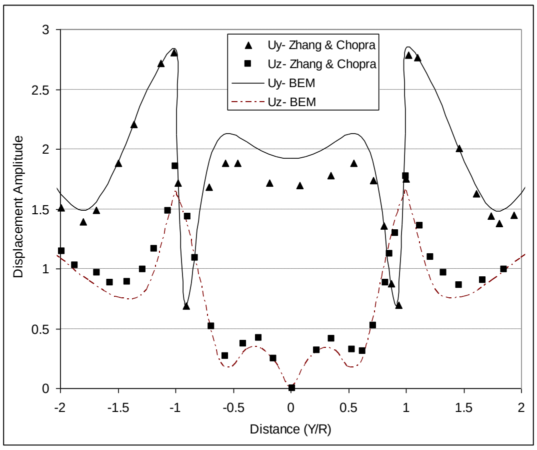
بنــابراین رابطــه $ds_1 ds_2 = |j_3| dt_1 dt_2 = \frac{1}{4} dt_1 dt_2$ به‌دست می‌آید. انتگرال مستطیلی بااستفاده از تبدیل‌های فـوق بـه انتگـرال‌هـای مثلثـی در حـوزهٔ $t_1 - t_2$ تبـدیل می‌شود و بااستفاده از روش اسـتاندارد گـوس محاسـبه می‌گردد [17, 18].

$$G(k) = \sum_{no.ofTriangles} \int_{-1}^{1}\int_{-1}^{1} u^*(t_1,t_2)\phi_k(t_1,t_2)|G(t_1,t_2)|(t_1+1)\frac{A}{4} dt_1 dt_2 \qquad (16)$$

صحت‌سنجی کد کامپیوتری به‌کار رفته در تحقیق

به‌منظور انجـام محاسـبات لازم در روی سـاختگاه‌هـای دره‌ای کد کامپیوتری به زبان فرتـرن (TDASC) نوشـته شــده اســت. ایــن کــد قابلیــت حــل انــواع مســائل الاستودینامیک سه‌بعـدی را کـه شـامل برخـورد امـواج حجمی زمین‌لرزه به ساختگاه‌های دره‌ای است داراست. به‌منظور اطمینان از صحت و ارزیابی کد TDASC برای محاسبهٔ جابه‌جایی‌های میدان آزاد سطح دره یـک‌سـری مقایسه با جواب‌های به‌دست‌آمـده در مقـالات مختلـف انجام شده است.

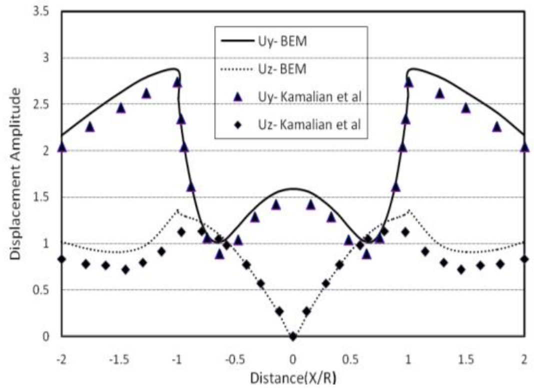
۱. تحقیق انجـام‌شـده توسـط ژانـگ و چـوپرا [19] در زمینهٔ تحلیل سه‌بعدی تغییرات مکانی جابـه‌جـایی در سطح دره با مقطع نـیم‌دایـره‌ای منشـوری تحـت اثـر موج ورودی SV با زاویـهٔ افقـی ۹۰ درجـه و زاویـهٔ قائم صفر درجـه و فرکـانس بـی‌بعـد واحـد درنظـر گرفته شده است (η). در شکل (۳) مقایسه بین نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عـددی بـا نتـایج تحلیـل‌هـای چوپرا انجام شده اسـت. روش اسـتفاده‌شـده توسـط چـوپرا، روش المـان مـرزی دوبعـدی اسـت کـه بـا انتگرال‌گیری تحلیلی در بعـد سـوم بـرای دره‌ای بـه طول بی‌نهایت به حالت سه‌بعدی تعمیم یافته اسـت. این در حالی است کـه در ایـن تحقیـق روش المـان مرزی سه‌بعدی استفاده شده اسـت. اخـتلاف انـدک بین نتایج را (کمتر از ده درصد) می‌توان به اخـتلاف در روش به‌کاررفته و استفاده از المان‌هـای دوبعـدی توسط چوپرا و سه‌بعدی در تحقیق حاضر نسبت داد.



شکل ۳ مقایسهٔ نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عددی و نتایج ارائه‌شده توسط ژانگ و چوپرا [19] برای موج ورودی SV با $\theta_h = 90$ $\theta_v = 0$ و فرکانس بی‌بعد واحد برای درهٔ نیم‌دایرهٔ منشوری

۲. مقایسهٔ نتایج به‌دست‌آمده از تحلیـل عـددی و نتـایج ارائه‌شده توسط کمالیان و همکاران [10] برای مـوج ورودی SV با $\theta_h = 90^\circ$ و $\theta_v = 0^\circ$ بـه‌ازای فرکـانس بی‌بعد مساوی نیم در شـکل (٤) ارائـه شـده اسـت. نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل حاضر با نتایج ارائه‌شـده توسـط کمالیـان و همکـاران انـدک اختلافـی نشـان می‌دهنـد ضـمن ایـن‌کـه رونـد کلـی کـاملا یکسـان می‌باشد. نتایج ارائـه‌شـده توسـط کمالیـان بـرای درهٔ دوبعدی بوده، درحـالی‌کـه در تحلیـل حاضـر مـدل سه‌بعدی از دره به‌طول محدود (۵ برابـر شـعاع دره) با روش المان مرزی به‌کارگرفته شده اسـت. بـه‌طـور

کلی جواب‌های به‌دست‌آمده از مدل‌های دوبعدی نسبت به مدل‌های سه‌بعدی اندکی کوچک‌تر می‌باشد و این مورد درمقایسهٔ نتایج به‌دست‌آمده به‌وضوح نمایان است. براساس مقایسهٔ نتایج انجام‌گرفته با رفرنس‌های متعدد کد المان مرزی توسعه‌یافته در این تحقیق صحت‌سنجی شد و از نتایج به‌دست‌آمده از آن برای انجام تحلیل‌های بعدی اطمینان حاصل گردید.



شکل ٤ مقایسهٔ نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عددی و نتایج ارائه‌شده توسط کمالیان و همکاران [10] برای موج ورودی SV با $\theta_h = 90$، $\theta_v = 0$ و فرکانس بی‌بعد نیم برای درهٔ نیم‌دایرهٔ منشوری

تحلیل‌های عددی

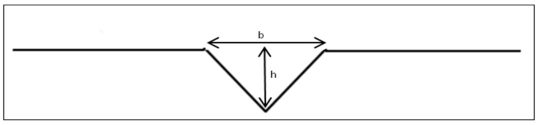
در این مطالعه بااستفاده از روش المان مرزی سه‌بعدی توسعه‌یافته به بررسی پارامترهای اثرگذار بر پاسخ دینامیکی ناهمواری‌های مختلف پرداخته می‌شود. از عوامل تأثیرگذار در این رفتارها می‌توان به پارامترهایی نظیر هندسهٔ توپوگرافی، جنس مصالح، پارامترهای امواج برخوردی (زاویه و فرکانس) اشاره کرد. برای بررسی پارامتر هندسهٔ توپوگرافی از چهار دره به شکل‌های مثلثی، ذوزنقه‌ای، نیم‌دایره و بیضوی استفاده می‌شود.

ارزیابی اثرات هندسه ومشخصه‌های امواج بر درهٔ مثلثی‌شکل

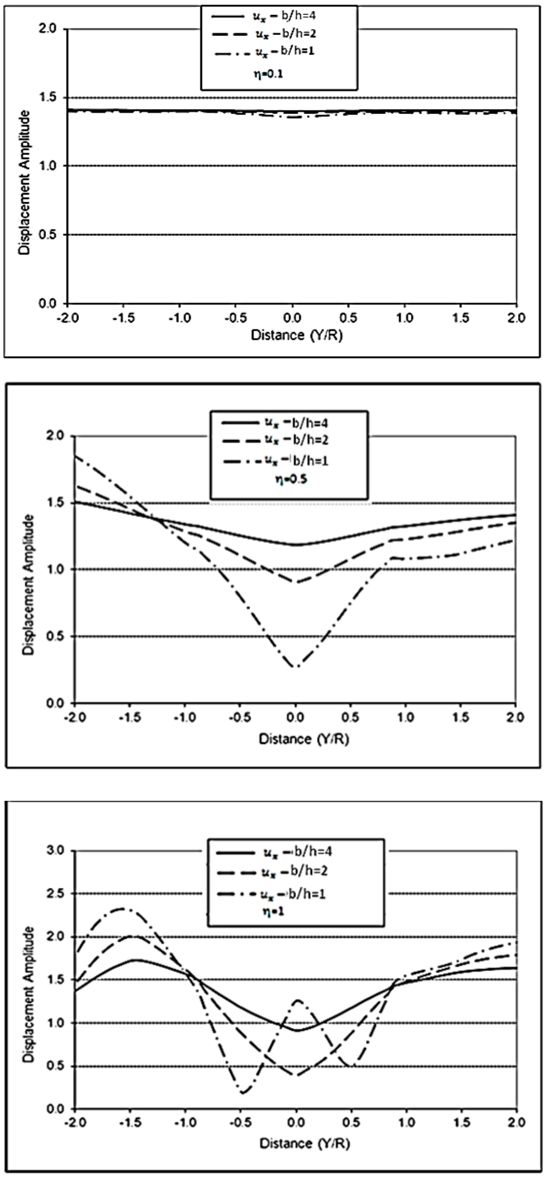
به‌منظور ارزیابی اثر شکل و عمق دره روی تفرق امواج از دره‌های سه‌بعدی تحلیل‌هایی روی دره‌هایی با شکل‌های مثلثی و درادامه روی دره‌های ذوزنقه‌ای، نیم‌دایره‌ای و نیم‌بیضوی انجام شده است. ابتدا دره‌ای به‌شکل مثلث با نسبت عرض قاعده (b) به عمق (h) برابر ۲،۱و٤ برای نشان دادن اثرات عمق و بازشدگی دره که از فاکتورهای مهم در طراحی سدها به‌شمار می‌آید، مدل می‌شود. شکل (٥) نشان‌دهندهٔ درهٔ مثلثی مدل‌شده می‌باشد. این مدل تحت برخورد موج برشی SH با زاویهٔ افقی و قائم ٤٥ درجه قرار می‌گیرد. به‌منظور ارزیابی اثرات فرکانس موج زمین‌لرزه این تحلیل‌ها به‌ازای فرکانس‌های بی‌بعد مختلف انجام شده و نتایج آن در شکل (٦) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش این نسبت اثرات توپوگرافی برروی رفتار دینامیکی درهٔ مثلثی افزایش می‌یابد. همچنین اثرات عمق و شکل دره تابعی از فرکانس می‌باشد. با افزایش فرکانس به‌دلیل کاهش طول موج برخوردی، اثرات ساختگاه افزایش می‌یابد. در فرکانس‌های پایین $(\eta \leq 0.1)$ به‌دلیل بزرگی قابل توجه طول موج نسبت به ابعاد عارضهٔ طبیعی تفرق امواج ناشی از وجود عارضه به حداقل می‌رسد و درواقع موج ورودی اثر وجودی دره را احساس نمی‌کند و پدیدهٔ تفرق روی امواج قابل چشم‌پوشی است. به‌عنوان یک قاعدهٔ کلی درصورتی‌که ابعاد دره با طول موج امواج برخوردی به آن قابل مقایسه باشد تفرق و آشفتگی ناشی از وجود دره روی الگوی تغییر مکان‌های به‌دست‌آمده در سطح آزاد دره بیشتر می‌شود.

درادامه به‌منظور بررسی تأثیر تغییرات زاویهٔ موج برخوردی به دره روی نتایج به‌دست‌آمده، تحلیل‌هایی با زاویهٔ برخورد مختلف انجام شده است و نتایج آن در شکل (۷) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییر زاویه تأثیر زیادی روی الگوی رفتار دینامیکی و همچنین مقادیر تغییرمکان‌های به‌دست‌آمده در سطح آزاد دره می‌گذارد. برخورد امواج درجهت قائم منجر به جابه‌جایی‌های متقارن حول محور تقارن دره و برخورد با زاویه‌های غیر از قائم منجر به جابه‌جایی‌های نامتقارن حول محور تقارن دره می گردد. در شرایط برخورد غیر قائم غالبا یک سمت دره که در سمت برخورد امواج قرار گرفته است جابه‌جایی‌های بزرگ و سمت دیگر

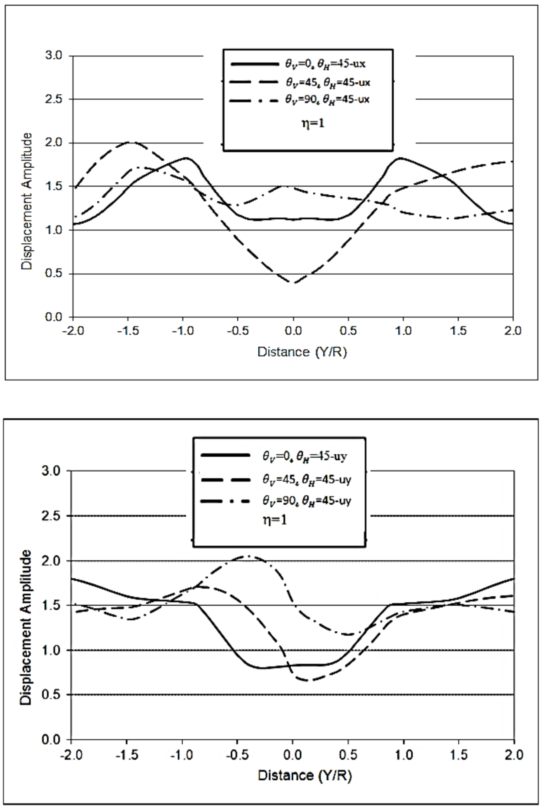
جابه‌جایی‌های کوچک‌تری را درمقایسه با جابه‌جایی‌های حالت قائم نشان می‌دهد.



شکل ۵ درهٔ مثلثی



شکل ٦ مقایسهٔ نمودارهای به‌دست‌آمده از تحلیل‌های انجام‌شده به‌ازای فرکانس‌های بی‌بعد ۵/۱، ۰/۰ و ۱ و شیب دیوارهٔ ۴۵، ٢٦/٦ و ۱۴/۴ درجه



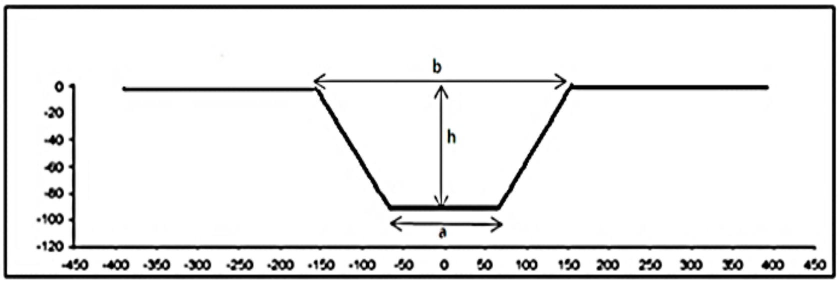
شکل ۷ مقایسهٔ نمودارهای به‌دست‌آمده از تحلیل‌های انجام‌شده در زاویه‌های مختلف در فرکانس بی‌بعد واحد

ارزیابی اثرات هندسهٔ درهٔ ذوزنقه‌ای

درهٔ ذوزنقه‌ای مطابق شکل (۸) به‌صورت سه‌بعدی منشوری درنظرگرفته شده است. در این تحلیل‌ها سه نسبت مختلف قاعدهٔ بزرگ (b) به عمق (h) تحت اثر برخورد موج SH با زاویه ٤٥ درجه و دو فرکانس بی‌بعد واحد و نیم مورد توجه بوده است. نتایج به‌دست‌آمده از این تحلیل‌ها در شکل (۹) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند کاهش نسبت (b/h) همان‌طوری که در درهٔ مثلثی گفته شد، باعث بیشتر شدن آشفتگی‌های ناشی از اثرات توپوگرافی می‌شود و میزان این افزایش به فرکانس وارده وابسته می‌باشد. با افزایش فرکانس بی‌بعد میزان این افزایش بیشتر می‌گردد و با کاهش فرکانس این تغییرات کاهش می‌یابد.

درادامهٔ این مطالعه به بررسی اثرات تغییر نسبت قاعدهٔ بالای ذوزنقه (b) به قاعدهٔ پایین (a) در

فرکانس‌های بی‌بعد مختلف تحت زاویهٔ قائم بر رفتار دینامیکی و میزان جابه‌جایی‌ها پرداخته شد. با کاهش نسبت دو قاعده، شکل دره به‌سمت مستطیل و با افزایش آن به‌سمت مثلث میل می‌کند. این تغییر شکل منجر به تغییرات بسیار زیاد شیب دیوارهٔ دره می‌گردد و این تغییرات باعث می‌شود تا اثرات شکل دره که به فرکانس وارده نیز وابسته است دچار تغییرات زیادی شود. درواقع می‌توان گفت که با افزایش شیب دیواره میزان آشفتگی‌های ناشی از اثرات ساختگاه افزایش و با کاهش این شیب این میزان کاهش می‌یابد. نتایج آن که در شکل (۱۰) ارائه شده است نشان می‌دهند که در فرکانس‌های بی‌بعد کمتر از نیم با افزایش نسبت دو قاعده مقادیر جابه‌جایی‌ها به مقدار بسیار ناچیزی افزایش می‌یابد. باتوجه به مقادیر ارائه‌شده در جدول (۱) می‌توان گفت که در فرکانس‌های بی‌بعد نیم و بزرگ‌تر از نیم و در نسبت‌های قاعدهٔ بزرگ‌تر از ۲/۵ مقادیر حاصل کاهش پیدا می‌کند. باتوجه به جدول (۲) مشخص است که وقتی نسبت دو قاعدهٔ ذوزنقه از ۲۰ به ۱ کاهش می‌یابد بیشترین درصد افزایش جابه‌جایی در فرکانس نیم ایجاد می‌شود.



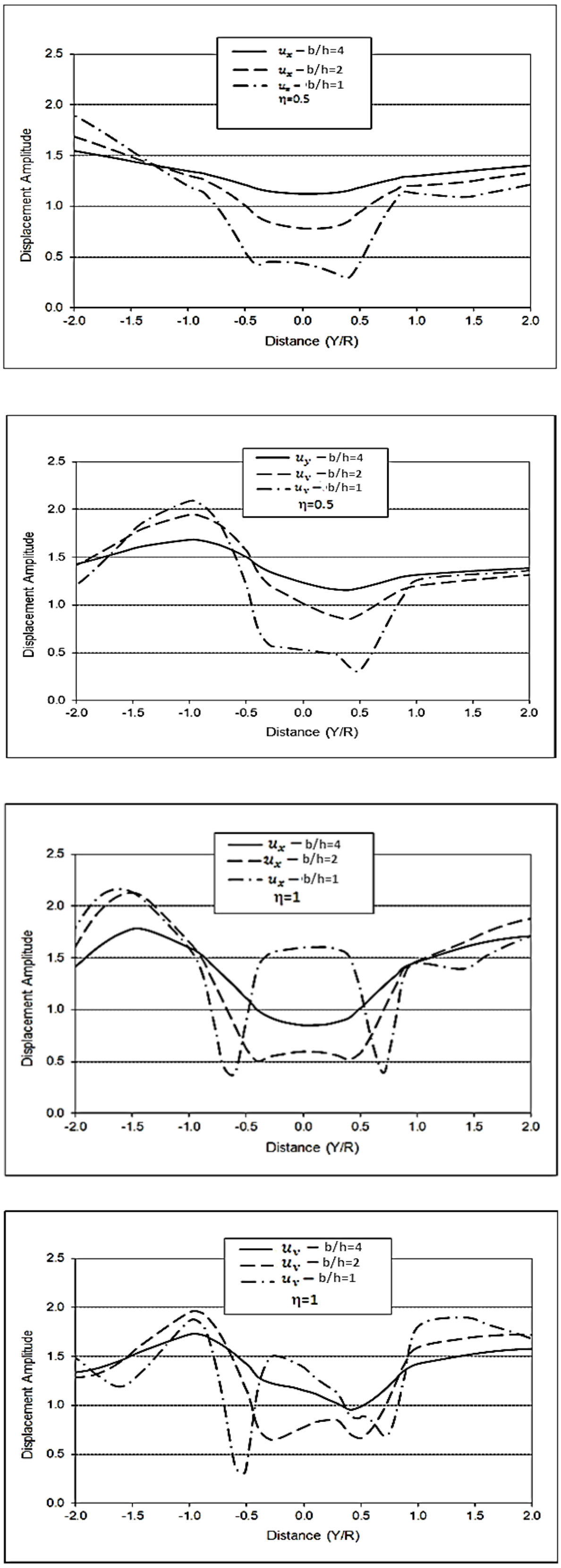
شکل ۸ درهٔ ذوزنقه‌ای

جدول ۱ مقادیر جابه‌جایی‌های به‌دست‌آمده در فرکانس‌های مختلف در نقطهٔ صفر و تحت زاویهٔ قائم

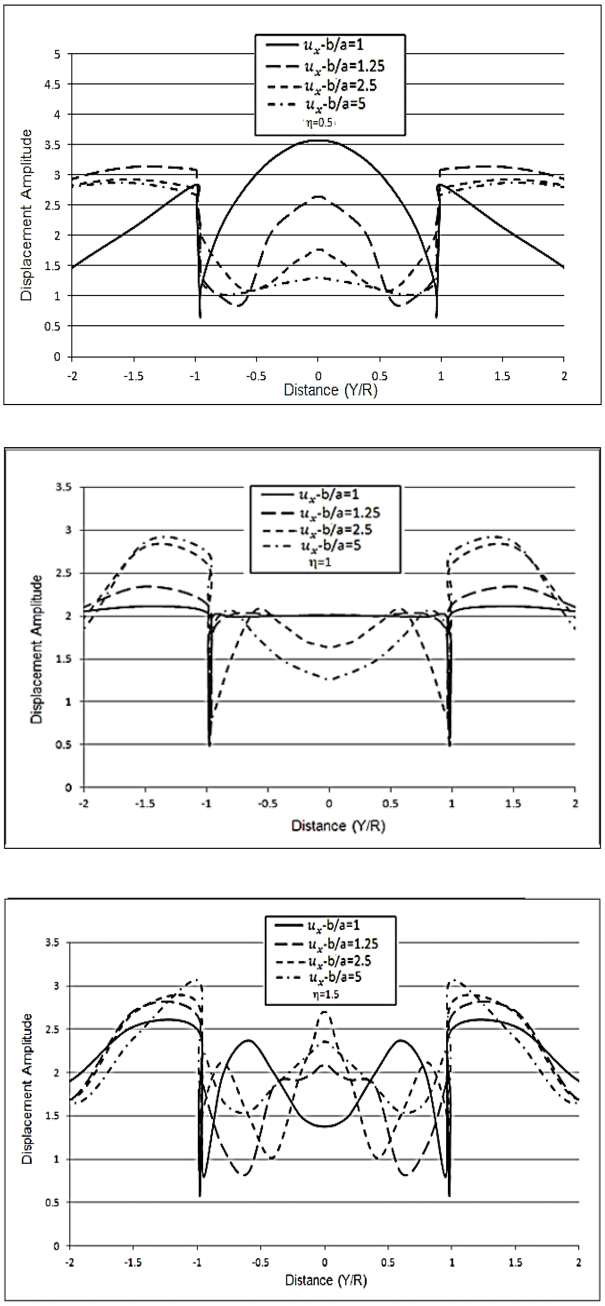
b/a	1	1.25	2.5	5	10	20
□=2	1.985	2.022	2.593	2.258	1.665	1.43
□=1.5	1.376	2.087	2.712	2.351	1.949	1.781
□=1	2.005	2.015	1.637	1.266	1.203	1.232
□=0.75	2.378	2.591	2.589	2.253	2.033	1.966
□=0.5	3.576	2.644	1.775	1.321	1.137	1.061
□=0.25	0.841	0.851	0.914	0.998	1.054	1.086
□=0.1	1.642	1.656	1.711	1.749	1.762	1.773

جدول ۲ درصد تغییرات جابه‌جایی در فرکانس‌های مختلف

□	2	1.5	1	0.75	0.5	0.25	0.1
درصد تغییرات	38.81	22.74	60.74	20.96	237.04	22.56	7.39



شکل ۹ مقایسهٔ نمودارهای به‌دست‌آمده از تحلیل‌های انجام‌شده در فرکانس بی‌بعد نیم و واحد و زاویهٔ ۴۵ درجه

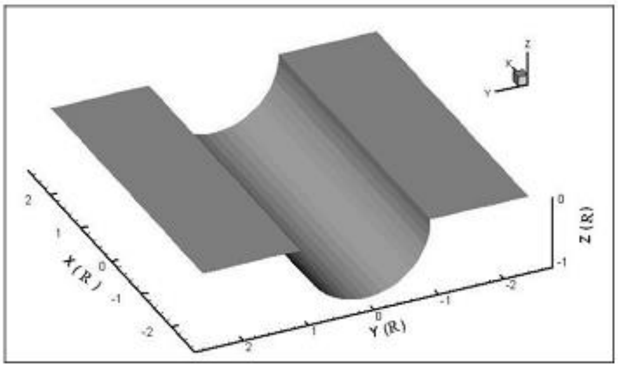


شکل ۱۰ مقایسهٔ نمودارهای به‌دست‌آمده از تحلیل‌های انجام‌شده در نسبت‌های دو قاعدهٔ مختلف

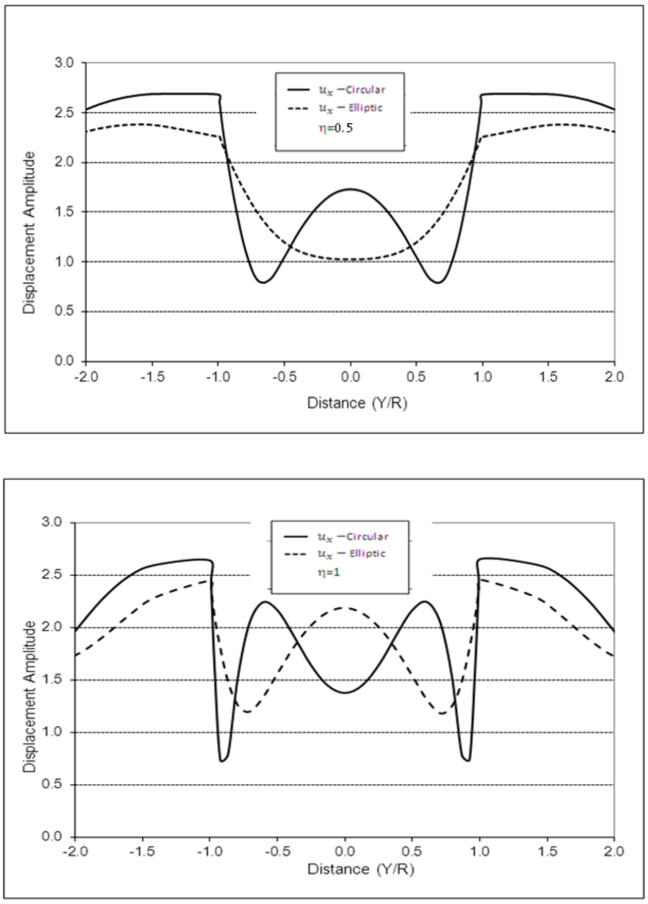
ارزیابی اثرات هندسهٔ درهٔ نیم‌دایره‌ای

برای ارزیابی اثرات تغییر عمق در درهٔ نیم‌دایره‌ای از دو دره به شکل‌های نیم‌بیضوی و نیم‌دایره مانند شکل (۱۱) استفاده می‌شود. درهٔ نیم‌بیضوی دارای دهانه‌ای برابر دهانهٔ دایره ولی عمقی برابر نصف شعاع دره دارد. تحلیل‌ها در سه فرکانس مختلف با مشخصات مصالح نسبت پواسون ۰/۳ و سرعت برشی ۱۰۲/۵ انجام شده است. نتایج به‌دست‌آمده از این نمودارها نشان می‌دهد که در یک فرکانس مشخص تغییر شکل و همچنین تغییر عمق تأثیرات محسوس و قابل توجهی را بر پاسخ دینامیکی دره می‌گذارد. نتایج نشان می‌دهد که درهٔ نیم‌دایره دچار بزرگ‌نمایی و تغییرات بیشتری درمقایسه با درهٔ نیم‌بیضوی می‌شود، چون عمق درهٔ نیم‌بیضوی نسبت به درهٔ نیم‌دایره‌ای درمقایسه با طول موج برشی

کوچـک‌تـر اسـت لـذا در ایـن حالـت اثـر دره روی جابه‌جایی‌های به‌دست‌آمده کمتر خواهد بود. به‌طوری‌که در فرکانس‌های بالا این حساسیت‌ها به عمق دره بیشتر خواهد شد. نتایج مربوط به مقایسهٔ دو شکل نیم‌بیضوی و نیم‌دایره‌ای در شکل (۱۲) آورده شده است.



شکل ۱۱ تصویر سه‌بعدی درهٔ نیم‌دایره



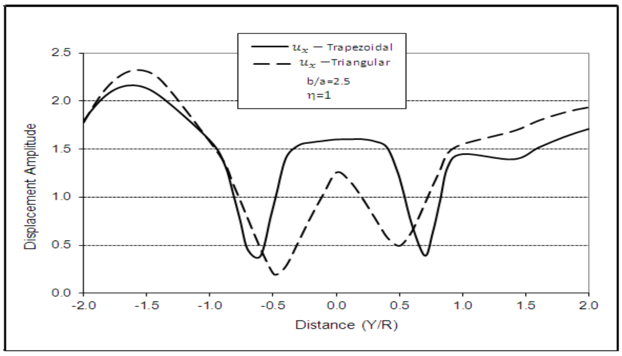
شکل ۱۲ مقایسهٔ نتایج به‌دست‌آمده برای دره‌های نیم‌بیضوی و نیم‌دایره‌ای تحت امواج SH با زاویهٔ برخورد ($\theta h = 90, \theta v = 0$)

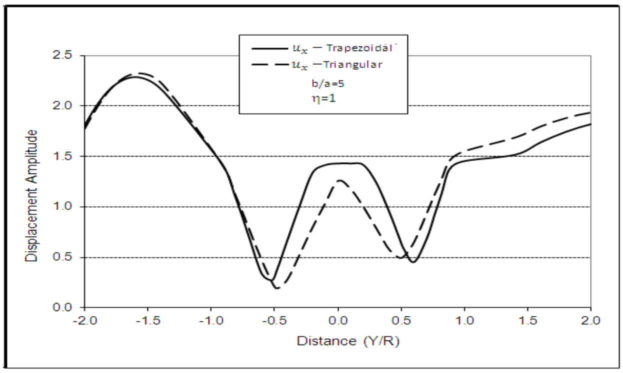
مقایسه بین دو درهٔ مثلثی و ذوزنقه‌ای

مقایسه‌ای بین دو شکل ذوزنقه‌ای و مثلثی با عمق و دهانهٔ برابر انجام شده که نمودارهای موردنظر در شکل (۱۳) ارائه شده است. درمورد نتایج به‌دست‌آمده از مقایسهٔ نمودارهای مثلثی و ذوزنقه ای می‌توان گفت که دلیل اختلاف این نمودارها به‌خاطر وجود قاعده در ذوزنقه می‌باشد، که باعث می‌شود اثر موج روی این شکل بیشتر و تغییرمکان آن زیاد شود. علاوه‌براین در جدول شمارهٔ (۳) نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌های انجام‌شده مربوط به یک نقطهٔ دل‌خواه (در این بررسی نقطهٔ صفر) در فرکانس‌ها و نسبت دو قاعده (b/a=2.5,5,10) آورده شده است. درصدهای ارائه‌شده در این جدول نشان‌دهندهٔ اختلاف ایجادشده براثر تغییر نسبت b/a در درهٔ ذوزنقه‌ای‌شکل درمقایسه با درهٔ مثلثی است که هم دارای عمق و هم دارای دهانهٔ برابر با درهٔ ذوزنقه‌ای می‌باشد. همان‌طور که از جدول مشخص است بیشترین درصد افزایش در نسبت b/a=2.5 و فرکانس بی‌بعد نیم می‌باشد، که به‌اندازهٔ ۶۱/۴۸ درصد افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که برای نسبت‌های b/a>10 رفتار درهٔ ذوزنقه‌ای با درهٔ مثلثی (هم‌عمق و دهانه) یکسان می‌باشد و می‌توان از اثرات تغییرشکل صرف‌نظر کرد.

جدول ۳ مقایسهٔ نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌های مختلف روی دره‌های ذوزنقه‌ای و مثلثی در فرکانس‌های مختلف و در نسبت‌های b/a=2.5,5,10

b/a	2.5	5	10
□=1.5	0.065	0.5	1.62
□=1	27.28	13.67	8.03
□=0.5	61.48	24.5	14.51
□=0.3	16.87	8.92	3.81

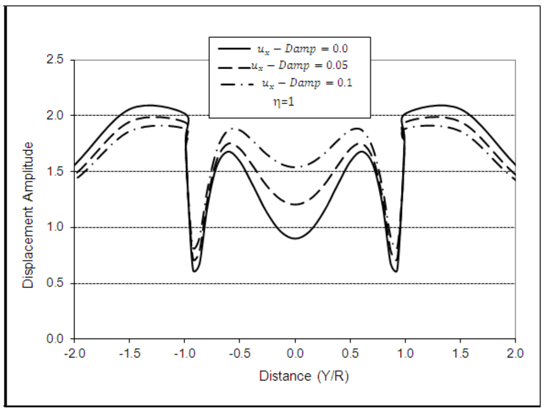


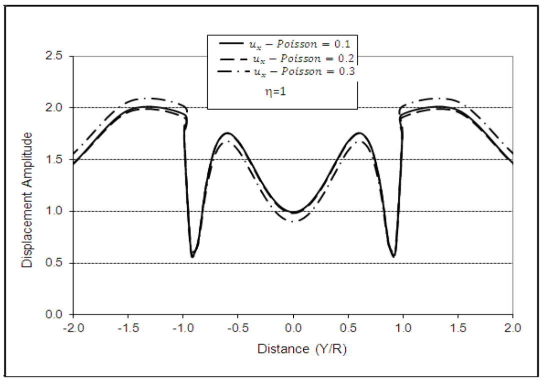


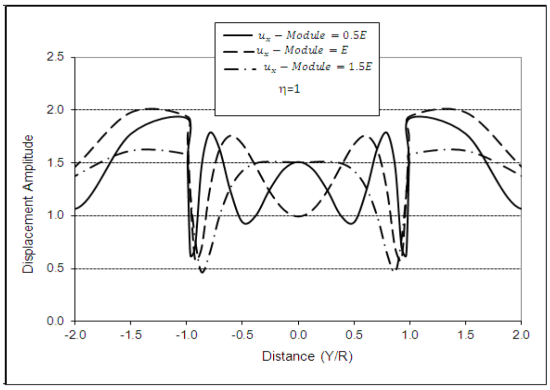
شکل ۱۳ مقایسهٔ نتایج به‌دست‌آمده برای دره‌هایی با شکل‌های ذوزنقه‌ای و مثلثی تحت امواج SH با زاویهٔ برخورد $\theta_h = 45, \theta_v = 45$ و فرکانس بی‌بعد واحد

ارزیابی اثرات جنس مصالح بر تفرق امواج از دره‌های سه‌بعدی

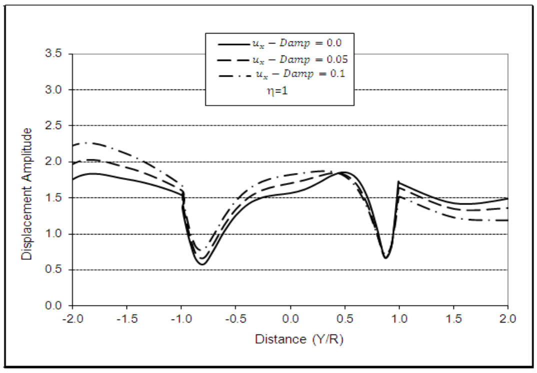
به‌منظور ارزیابی اثرات مشخصات مصالح شامل ضریب میرایی، ضریب پواسون و همچنین مدول الاستیسیته تحلیل‌های مختلفی با مقادیر متفاوت از این پارامترها انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده در دو زاویهٔ برخورد مختلف در شکل‌های (۱٤) و (۱٥) ارائه شده‌اند. با مقایسهٔ نتایج به‌دست‌آمده از نمودارهای مربوط به این پارامترها می‌توان فهمید که تغییرات پارامترهای میرایی و پواسون تأثیری بر الگوی تغییرات تغییرمکان‌های به‌دست‌آمده ندارد ولی در مقادیر به‌دست‌آمده تأثیرگذار است. علاوه‌براین به‌عنوان یک قاعدهٔ کلی می‌توان گفت که افزایش میرایی منجر به تغییرمکان‌های بزرگ‌تری نسبت به حالت بدون میرایی در راستای وجهی می‌شود که در معرض برخورد موج قرار می‌گیرد. در مورد تغییر پارامتر ضریب پواسون نیز می‌توان گفت که با تغییر این پارامتر تغییرمکان‌های به‌دست‌آمده دچار تغییر می‌شود. با توجه به نتایج حاصل‌شده لازم است که برای به‌دست آوردن مقادیر دقیق تغییرمکان دره، مقدار دقیق این پارامترها درنظر گرفته شود. درمورد مدول الاستیسیته نیز همچنان که از نمودارها مشخص است می‌توان گفت که بیشتر از دو پارامتر دیگر بر الگوی تغییرمکان‌های به‌دست‌آمده تأثیر دارد و مانند میرایی و ضریب پواسون تعیین مقدار دقیق آن لازم می‌باشد.

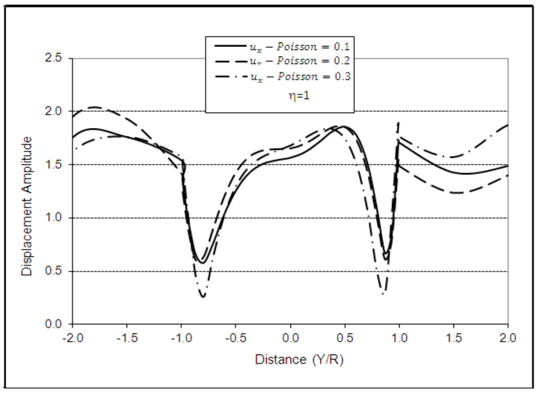


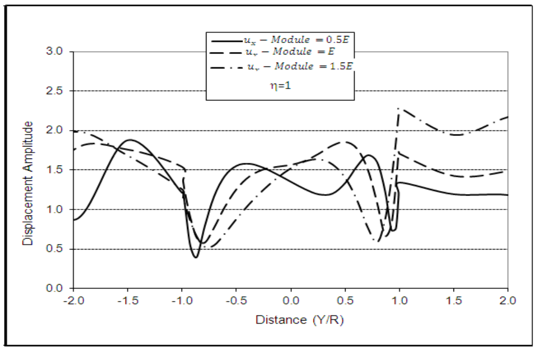




شکل ۱٤ مقایسهٔ نتایج به‌دست‌آمده تحت امواج SH با زاویهٔ برخورد ($\theta_h = 45, \theta_v = 0$) و فرکانس بی‌بعد واحد







شکل ۱۵ مقایسهٔ نتایج به‌دست‌آمده تحت امواج SH با زاویهٔ برخورد ($\theta_h = 45, \theta_v = 45$) و فرکانس بی‌بعد واحد

نتیجه‌گیری

در دو دههٔ اخیر روش‌های مرزی محبوبیت فزاینده‌ای پیدا کرده‌اند. با چنین الگوریتم‌هایی تنها شرایط مرزها و گسسته‌سازی آنها برای حل معادلهٔ موج به‌کار می‌رود. این روش از معرفی مرزهای موهومی که در روش‌های ناحیه‌ای معمولا مورد نیاز است اجتناب می‌کند. در این تحقیق اثرات پارامترهای مختلف روی بزرگ‌نمایی امواج لرزه‌ای با استفاده از روش المان مرزی سه‌بعدی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که پارامترهای مختلفی مانند پارامترهای موج (فرکانس و جهت برخورد) و همچنین پارامترهای هندسهٔ توپوگرافی از عوامل تأثیرگذار بر الگوی جابه‌جایی دره می‌باشد. همچنین نشان داده شد که میزان اثرگذاری شکل دره و عمق دره به فرکانس وارده بسیار وابسته می‌باشد، به‌این‌صورت که با افزایش فرکانس اثرات افزایش عمق بسیار محسوس خواهد بود. مقدار بزرگ‌نمایی و افزایش عمق نیز با یکدیگر ارتباط مستقیم دارند. همچنین از نمودارها مشخص است که اثرات مصالح (میرایی و پواسون) برروی رفتار دینامیکی و الگوی جابه‌جایی غیرقابل‌انکار است و برای افزایش دقت در محاسبات لازم است که درنظر گرفته شوند. درمورد دره‌های ذوزنقه‌ای نیز می‌توان گفت که به‌دلیل وجود قاعدهٔ پایین میزان جابه‌جایی بیشتری نسبت به درهٔ مثلثی هم‌عمق و دهانهٔ برابر با آن ایجاد می‌شود، که این موضوع به‌دلیل افزایش سطح توپوگرافی مؤثر در تفرق امواج لرزه‌ای می‌باشد.

مراجع

1. Alves, W.S., "Nonlinear Analysis of Pacoima Dam with Spatially Non-uniform Ground Motion", PhD Dissertation, California Institute of Technology, (2005).
2. Kojic,S.B., "Earthquake Response of Arch Dams to Non-uniform Canyon Motion, PhD Dissertation", Southern California University, (1988).
3. Mossessian, T.K. and Dravinski, M., "Amplification of Elastic Waves by a Three Dimensional Valley. part2: Transient Response", Earth Eng and StrucDyn, Vo1. 19, (1990).
4. Mossessian, Tomi, K. and Dravinski, M., "Amplification of Elastic Waves by a Three Dimensional Valley. partl: Steady-state Response", Earth Eng and StrucDyn, Vo1.19, (1990).
5. Yuan, C. Z., Xiong, Z. J. and Cheung, Y. K., "A Semi-Analytical Boundary Element Method for Scattering of Waves in a Half Space", Earth Eng and Struc Dyn,Vo1. 19, (1990).
6. Eshraghi, H &Dravinski, M., "Scattering of Plane Harmonic SH, SV, P and Rayleigh Waves by Non-axisymmetric Three dDimensional Canyons: A Wave Function Expansion Approach", Earth Eng and Struc.Dyn, Vo1. 18, (1989).

۷. تاری‌نژاد، رضا، «بارگذاری زلزله برای سازه‌های واقع در ساختگاه‌های دره‌ای»، رسالهٔ دکتری با راهنمایی دکتر محمدتقی احمدی، دانشکدهٔ

فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۸٦).

8. Kamalian, M., Jafari, M.K., Sohrabi-Bidar, A. Razmkhah, A.,"Shape Effects on Amplification Potential of Two Dimensional Hills", JSEE, Vol. 8, No.2, PP. 58-70 (In Farsi), (2003).
9. Kamalian, M., Jafari, M.K., Sohrabi, A., "On Time-domain Two-dimensional Site Response Analysis of Topographic Structures by BEM", *J. Seismological Earthquake Engineering*, 5(2), PP. 35-45, (2003).
10. Kamalian, M., Gatmiri, B., Sohrabi, A., "Amplification Pattern of 2D Semi-sine-shaped Valleys Subjected to Vertically Propagating Incident Waves", Commun. Numer. Meth. Engng, 23, PP. 871–887, (2007).
11. Omidvar, B., Rahimian, "M.3D Topography Effects on Amplification of Plane Harmonic Body and Surface Waves", JSEE, (2010).
12. Omidvar, B.,Rahimian, M. "Three-Dimensional Scattering of Plane Harmonic SH", SV, and P Waves in Multilayered Alluvial Valleys. *ASIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING (BUILDING AND HOUSING)* Vol. 11, No. 5, PP. 605-626, (2010).
13. Gatmiri, B. and Arson, C. "Seismic Site Effects by an Optimized 2D BE/FE Method II. Quantification of Site Effects in Two-Dimensional Sedimentary Valleys", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 28, PP. 646-661, (2008).
14. Gatmiri., B, Nguyen, K-V, Dehghan, K., "Seismic Response of Slopes Subjected to Incident SV Wave by an Improved Boundary Element Approach", *Int. J. Numer.* Anal. Meth. Geomech, (2007).
15. Sohrabi-Bidar, A., Kamalian, M., Jafari, M.K, "Time-domain BEM for Three-dimensional Site Response Analysis of Topographic Structures", *Int. J. Numer. Meth. Engng*, 79, PP. 1467–1492, (2009).
16. Sohrabi-Bidar, A., Kamalian, M. and Mohammad Kazem Jafari, "Seismic Response of 3-D Gaussian-Shaped Valleys to Vertically Propagating Incident Waves", *Geophys. J. Int.* 183, PP. 1429–1442, (2010).
17. Dominguez, J., "Boundary Elements in Dynamics", Elsevier, (1993).
18. Manolis, G.D., Beskos, D.E., "Boundary Element Methods in Elastodynamics", Unwin Hyman Ltd, ISBN: 004-620019-3, (1988).
19. Zhang, L. and Chopra, A. K., "Three-Dimensional Analysis of Spatially Varying Ground Motions around a Uniform Canyon in a Homogeneous Half-space", Earthquake Engineering and Structural Dynamics; 20, PP. 911-926, (1991).